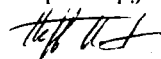


На правах рукописи



ПЕРВУХИН ИЛЬЯ ДМИТРИЕВИЧ

**ДВУХЭТАПНАЯ ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
СИСТЕМ С ЖЁСТКИМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ В
УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ**

05.13.01 — Системный анализ, управление и обработка информации
(в химической технологии)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Казань 2011

Работа выполнена на кафедре системотехники Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский государственный технологический университет».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Зиятдинов Надир Низамович

Официальные оппоненты доктор технических наук, профессор
Егоров Александр Фёдорович

доктор технических наук, профессор
Елизаров Виктор Иванович

Ведущая организация ГОУ ВПО «Тамбовский
государственный технический
университет»

Защита состоится «1» июля 2011 года в 14:00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.080.13 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Казанский государственный технологический университет» по адресу: г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68, ауд. А-330.

Отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенный гербовой печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68, КГТУ, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.080.13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного технологического университета.

С авторефератом диссертации можно ознакомиться на сайте www.kstu.ru.

Автореферат разослан «31» _____ 2011 года.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000678119

Учёный секретарь
Диссертационного Совета
доктор технических наук

А. В. Клинов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Разработка подходов к системному анализу, моделированию и оптимизации химико-технологических систем (ХТС) является актуальным направлением исследований в современной науке. К настоящему времени создано множество универсальных и специализированных пакетов моделирующих программы, предназначенных для решения задач системных исследований и проектирования процессов химической технологии. В их основу положены различные физико-химические модели отдельных типовых процессов. Качество получаемых результатов проектирования во многом зависит от достоверности используемой исходной информации. К сожалению, для ряда параметров на этапе проектирования вместо точного значения известны лишь диапазоны их возможного изменения. Известно, что найденные с применением существующих универсальных моделирующих программы проектные решения без учёта факторов неопределённости приводят в ряде случаев к созданию негибких (неработоспособных) систем, либо систем, существенно отличающихся от оптимальных. В процессе эксплуатации таких установок отклонения неопределённых параметров от номинальных значений могут снизить качество выпускаемой продукции, или вызвать переход к опасным или недопустимым режимам работы. Следовательно, учет неопределённости исходной информации при решении задач системных исследований существующих и оптимального проектирования новых ХТС является актуальной задачей.

В настоящее время задачами системных исследований и проектирования технических систем с учётом неопределённости в области химической технологии за рубежом занимаются Grossmann I.E., Pistikopoulos E.N., Floudas C.A., Rooney W.C., Biegler L.T., Ierapetritou M.G., Pardalos P.M., в России — Островский Г.М., Волин Ю.М., Дворецкий С.И., Егоров А.Ф., Мешалкин В.П., Холоднов В.А., Елизаров В.И.

Однако решение поставленной проблемы нельзя считать завершённым. Разработанные методы оценки гибкости и решения задач проектирования с учётом неопределённости требуют больших временных затрат и вычислительных ресурсов.

Цель работы. Разработка эффективных подходов и алгоритмов для решения задачи оптимального проектирования новых и системных исследований существующих ХТС с учётом неопределённости в исходной информации и их программной реализации.

Задачи исследования:

- Разработать эффективные подходы и алгоритмы для решения задачи оптимального проектирования и исследования ХТС с учётом неопределённости исходной информации, для чего необходимо:
 - Разработать способ и алгоритмы вычисления функции гибкости существующей ХТС на заданной области неопределённости;

- Разработать способ оценки возможности создания гибкой ХТС на заданной области неопределённости и алгоритмы его реализации.
- Создать программный комплекс оптимального проектирования гибких ХТС на основе разработанных алгоритмов;
- Апробировать программный комплекс на решении задач оптимального проектирования ХТС при учёте неопределённости.

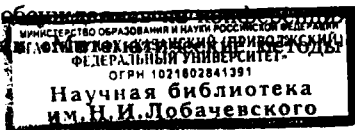
Научная новизна работы:

- Разработан новый эффективный метод решения задачи расчета функции гибкости ХТС в условиях частичной неопределённости исходной информации, основанный на разбиении области неопределённости и вычислении оценок целевой функции.
- Сформулирована новая задача оценки существования гибкой ХТС на заданной области неопределённости, предложен подход и разработан алгоритм для ее решения.
- Предложена постановка задачи проектирования оптимальной ХТС с учётом неопределённости исходной информации с помощью функции гибкости в виде задачи полубесконечного программирования. Разработаны алгоритмы решения задачи проектирования оптимальных гибких ХТС на основе метода внешней аппроксимации, использующий предложенный эффективный способ вычисления функции гибкости.

Практическая значимость.

- Разработанный подход и алгоритмы оценки гибкости ХТС могут быть использованы как надстройка в универсальных моделирующих программах, так и в автономном варианте.
- Создан программный комплекс проектирования оптимальных гибких ХТС, включающий в себя все предложенные алгоритмы. Комплекс может быть использован для решения оптимизационных задач химической технологии и в других отраслях промышленности.
- С помощью созданного программного комплекса была выполнена оценка эффективности работы подсистемы узла захлаживания пирогаза установки Этилен-200 завода Этилен ОАО «КазаньОргсинтез» и выданы рекомендации по модернизации системы с целью удовлетворения новым объёмам перерабатываемого сырья.
- Положения, разработки и научно-практические рекомендации кандидатской диссертации использованы в учебном процессе кафедры математического моделирования и оптимизации химико-технологических процессов Санкт-Петербургского Технологического института.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XX Международной научной конференции «Химическая технология в технике и



технологиях» ММТТ-20 (Ярославль, 2007 г.), II Международной научной конференции «Современные проблемы прикладной математики и математического моделирования» (Воронеж, 2007 г.), XXI Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» ММТТ-21 (Саратов, 2008 г.), III Международной научной конференции «Логистика и экономика ресурсосбережения и энергосбережения в промышленности» ЛЭРЭП-3 (Казань, 2008 г.), XXII Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» ММТТ-22 (Псков, 2009 г.), научных сессиях КГТУ (Казань, 2006-2011 г.г.)

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 8 научных работах, в том числе 3 статьи в ведущих научных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 198 страницах машинописного текста, состоящего из введения, четырёх глав, содержащих основные результаты работы, выводов, приложения, списка использованной литературы из 175 наименований. Работа содержит 13 рисунков и 25 таблиц.

Автор выражает благодарность профессору Островскому Г.М. и доценту Лаптевой Т.В. за ценные советы и замечания, высказанные в процессе выполнения работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертационной работы, обозначены цель и задачи исследования.

В первой главе дана постановка задачи проектирования оптимальной ХТС с учётом неопределённости в виде:

$$\min_{d, z} E[f(d, z; \theta)] \quad (1)$$

$$\chi(d) \leq 0 \quad (2)$$

где f — целевая функция задачи оптимального проектирования, неравенства ψ_j представляют собой математическую формулировку проектных ограничений, $\chi(d)$ — функция гибкости, d — вектор конструктивных переменных (размеры аппаратов ХТС и её структурные параметры), z — вектор технологических управляющих переменных (например, температура, давление, расход), θ — вектор неопределённых параметров математической модели и внешних условий функционирования. Обычно, неполнота наших знаний сводится к тому, что значения параметров θ на этапе проектирования известны неточно. О них только известно, что они принадлежат некоторой области T .

Система является гибкой, если для каждого значения неопределённого параметра $\theta \in T$ можно найти такие управления z , при которых будут вы-

полняться проектные ограничения $\psi_j(d, z, \theta) \leq 0$, $j = \overline{1, m}$. Математически это условие записывается следующим образом¹:

$$\chi(d) \leq 0 \quad (3)$$

где

$$\chi(d) = \max_{\theta \in T} \min_z \max_{j \in J} \psi_j(d, z, \theta), \quad J = \overline{1, m} \quad (4)$$

Это условие используется как ограничение в задаче (1).

В главе дан обзор подходов к решению задачи оптимального проектирования, сложившихся в настоящее время. Рассмотрены два подхода к задаче проектирования, приводящие к двухэтапной и одноэтапной задачам оптимизации. Приведены постановки задач оптимального проектирования, дана классификация задач, рассмотрены методы их решения.

Отмечено, что на сегодняшний день при решении задачи проектирования учет неопределённости в исходной информации, как правило, заключается в использовании отраслевых коэффициентов запаса. При этом, в большинстве случаев используется одноэтапная постановка задачи проектирования, которая не предусматривает возможности корректирования управляющих переменных на этапе функционирования, что приводит к более затратным конструкциям. Таким образом, практический интерес представляет двухэтапная постановка задачи, которая позволяет настраивать управляющие переменные на этапе функционирования.

В главе сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена важнейшим вопросам системного анализа ХТС: разработке нового подхода и новых алгоритмов оценки гибкости ХТС (способности ХТС сохранять работоспособность на стадии эксплуатации при изменении внутренних и внешних факторов). В качестве оценки гибкости ХТС на заданной области неопределённости T используется функция гибкости $\chi(d)$, имеющая вид (4).

Для расчёта функции гибкости ХТС на заданной области неопределённости предложен новый метод вычисления функции гибкости — метод разбиения и границ (РГ). Метод РГ представляет собой двухуровневую процедуру, которая основывается на разбиении области T на подобласти T_l . На нижнем уровне вычисляются верхняя $\chi^{U,k}$ и нижняя $\chi^{L,k}$ оценки функции гибкости для всей области T . Верхний уровень используется для уточнения оценок функции гибкости, для чего проводится разбиение некоторых подобластей, полученных на предыдущих итерациях.

Пусть имеется разбиение области T на L подобластей T_l , $l = \overline{1, L}$:

$$\bigcup_{l=1}^L T_l = T, \quad T_l \cap T_{l_j} = \emptyset, \quad \forall l_i \neq l_j \quad (5)$$

¹Halemane K.P., Grossmann I.E. Optimal Process Design under Uncertainty. — AIChE Journal, 1983; v 29: P. 425-433.

Показано, что в качестве верхней оценки задачи (4) на k -ой итерации алгоритма может быть использовано решение следующей задачи:

$$\chi^{U,k}(d) = \min_{z_l \in Z, u} u \quad (6)$$

$$\max_{\theta \in T_l^k} \psi_j(d, z_l, \theta) \leq u, \quad j = \overline{1, m}, l = \overline{1, L_k} \quad (7)$$

здесь L_k — число областей, на которое разбита заданная область неопределенности на k -ой итерации алгоритма РГ.

Задача (6) является задачей полубесконечного программирования и может быть решена с использованием метода внешней аппроксимации (ВА). В качестве нижней оценки функции гибкости может быть использовано решение задачи нелинейного программирования (НЛП):

$$\chi^{L,k}(d) = \min_{z_q \in Z, u} u \quad (8)$$

$$\psi_j(d, z_q, \theta_q) \leq u, \quad j = \overline{1, m}, \theta_q \in S^k, q = \overline{1, G^k} \quad (9)$$

здесь S^k — множество критических точек, полученных на k -ой итерации алгоритма при решении задачи (6), G^k — количество критических точек в множестве S^k .

Для улучшения оценки разбивается подобласть области неопределенности.

Предложенный подход к вычислению значения функции гибкости апробирован на примере задач «реактор-теплообменник»^{II} и «система теплообменников».^{III} Адекватность и эффективность предложенного алгоритма были оценены в сравнении с методом ветвей и границ (ВГ).^{IV}

Пример 1: «реактор-теплообменник» (см. рис. 1). В реакторе идеального смешения объемом V происходит экзотермическая реакция первого порядка вида $A \rightarrow B$. Теплообменник служит для поддержания температуры внутри реактора ниже заданной величины T_1 .

В рассматриваемом примере объем реактора V (м^3), площадь поверхности теплообмена в теплообменнике A_T (м^2), — конструктивные параметры, температура реакции $T_1 = 311 \div 389 \text{ K}$, выходная температура потока охлаждающей воды $T_{w2} = 301 \div 355 \text{ K}$ — управляющие переменные (являются поисковыми в задаче оптимизации). Переменные состояния: C_{A1} , T_2 , F_1 , F_w : — концентрация реагента A в продукте ($\text{кмоль}/\text{м}^3$), температура (K), расход ($\text{м}^3/\text{ч}$) рециркуляционного потока и расход потока

^{II}Halemane K.P., Grossmann I.E., 1983

^{III}Nishida N, Liu Y.A, Lapidis L. Studies in chemical process design and synthesis: III A simple and practical approach to the optimal synthesis of heat exchanger networks. — AIChE Journal, 1977, v. 23, P. 77

^{IV}Островский Г.М., Волин Ю.М. Технические системы в условиях неопределенности: анализ гибкости и оптимизация: учебное пособие. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. — 319 с.

охлаждающей воды ($\text{м}^3/\text{ч}$), соответственно. Неопределенные параметры: $\theta = [F_0, T_0, T_{w1}, k_R, U]$: — расход входного потока в реактор, ($\text{м}^3/\text{ч}$), его температура, (К), входная температура потока охлаждающей воды, (К), скорость реакции, ($\frac{\text{м}^3}{\text{кмоль} \cdot \text{ч}}$) и коэффициент теплопередачи, ($\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{К}}$), соответственно. Область неопределённости в задаче задана интервально (см. табл. 1).

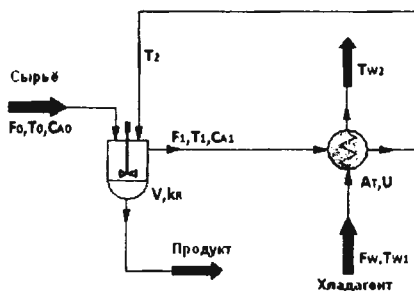


Рисунок 1 – Технологическая схема системы реактор-теплообменник

Таблица 1 Отклонение неопределённых параметров от номинального значения

№ задачи	F_0	T_0	T_{w1}	k_R	U
1 (номинал)	45.36	333	300	9.81	1635
2	$\pm 10\%$	$\pm 2\%$	$\pm 3\%$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$
3	$\pm 12.5\%$	$\pm 2.5\%$	$\pm 3.75\%$	$\pm 12.5\%$	$\pm 12.5\%$
4	$\pm 15\%$	$\pm 3\%$	$\pm 4.5\%$	$\pm 15\%$	$\pm 15\%$
5	$\pm 17.5\%$	$\pm 3.5\%$	$\pm 5.25\%$	$\pm 17.5\%$	$\pm 17.5\%$
6	$\pm 20\%$	$\pm 4\%$	$\pm 6\%$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$
7	$\pm 25\%$	$\pm 5\%$	$\pm 7.5\%$	$\pm 25\%$	$\pm 25\%$
8	$\pm 30\%$	$\pm 6\%$	$\pm 9\%$	$\pm 30\%$	$\pm 30\%$

В табл. 2 представлены результаты (значение функции гибкости, время расчёта и число совершенных итераций), полученные с использованием двух подходов: известного подхода на основе метода ВГ (χ_{BV}, t_{BV}) и предлагаемого подхода на основе разбиения области неопределённости и вычисления оценок (РГ) (χ_{PB}, t_{PB}) для различных вариантов значений конструктивных переменных (площади поверхности теплообменника A_T , объёма реактора V) и размеров области неопределённости.

Пример 2: «система теплообменников» (см. рис. 2). Технологическая система состоит из семи теплообменников, одного холодильника. В систему извне поступают четыре горячих потока ($H_i, i = \overline{1, 4}$) и четырёх холодных потоков ($C_i, i = \overline{1, 4}$). Конструктивными переменными здесь являются поверхности теплообмена A_j в теплообменниках и холодильнике (м^2). Расход охлаждающей воды F_w , (кг/ч), в холодильнике используется как управляющая переменная.

Таблица 2 – Значения функции гибкости системы «реактор-теплообменник», полученные методами РГ (χ_{PB}) и ВГ (χ_{BB})

V	A_T	№ задачи	χ_{PB}	t_{PB}, c	χ_{BB}	t_{BB}, c
1.0	3.0	2	0.308	2.468	0.328	7.625
3.0	5.0	2	0.087	0.640	0.100	3.312
8.0	12.0	2	-0.013	2.328	-0.014	7.453
8.0	12.0	3	-0.009	2.375	-0.009	4.675
8.0	12.0	4	-0.003	5.303	-0.003	6.502
12.5	14.5	5	-0.031	8.328	-0.030	10.437
12.5	14.5	6	-0.026	13.528	-0.025	14.674
12.5	14.5	7	-0.018	27.234	-0.019	30.890
15.0	18.0	8	7.129	15.250	7.048	28.563

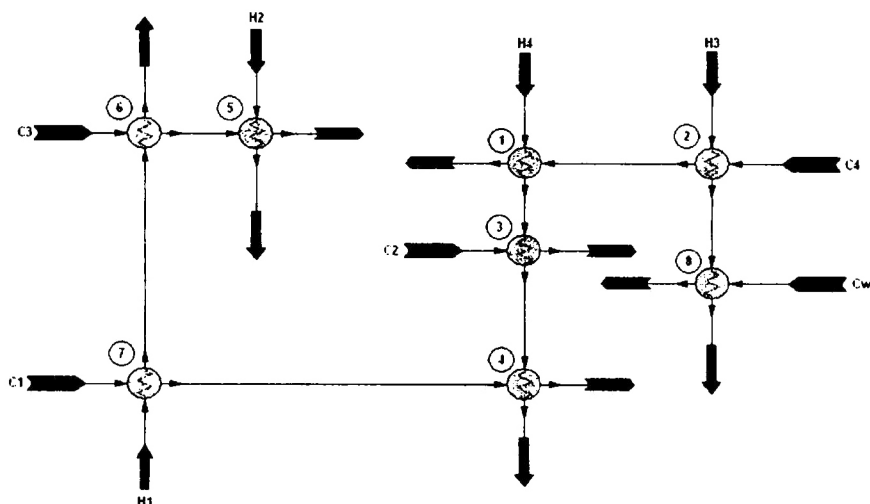


Рисунок 2 – Технологическая схема системы теплообменников

Задача содержит 1 управляющий параметр — F_w — расход воды в холодильнике, 16 неопределённых параметров (коэффициенты теплопередачи теплообменников и холодильника и температуры входных горячих и холодных потоков). Область неопределённости задана интервально.

Задаваясь различными значениями поверхностей теплообмена $A_j, j = \overline{1, 8}$ (табл. 3) и размерами области неопределённости (табл. 4), методами РГ (χ_{PB}) и ВГ (χ_{BB}) была вычислена функция гибкости (см. табл. 5).

Сравнивая результаты, полученные с использованием двух подходов к вычислению значения функции гибкости, следует отметить, что предлагаемый РГ-метод даёт одинаковые значения функции гибкости с известным методом ВГ. Относительно скорости получения результата, следует отме-

Таблица 3 – Значения поверхностей теплообмена для примера «Система теплообменников»

Вариант конструкции	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
1	0.01	120	11.70	26.10	38.10	8.90	2.80	28
2	0.01	128	11.70	26.10	38.10	8.90	2.80	28
3	6.63	87.39	19.87	22.27	47.62	8.93	4.55	118.73
4	6.88	85.60	19.83	22.09	47.71	8.70	4.72	121.36

Таблица 4 – Отклонение неопределённых параметров от номинального значения

№ задачи	T_{C1}	T_{C2}	T_{C3}	T_{C4}	T_{H1}	T_{H2}	T_{H3}	T_{H4}	U_j
1 (номинал)	333	389	311	366	433	522	500	544	203
2	±1%	±1%	±1%	±1%	±1%	±1%	±1%	±1%	±1%
3	±1%	±1%	±1%	±1%	±1%	±1%	±1%	±1%	±5%
4	±5%	±5%	±5%	±5%	±5%	±5%	±5%	±5%	±5%

титель преимущество подхода на основе предлагаемого метода РГ.

Сравним подробнее оба подхода к вычислению значения функции гибкости. Подход, базирующийся на методе ВГ, на каждом шаге решает задачу меньшей размерности, чем подход, основанный на методе РГ. Однако, метод ВГ при некачественном вычислении оценок критерия задачи даст возврат к узлам, оставшимся неветвлёнными на предыдущих итерациях, что может привести к их полному перебору. В отличие от метода ВГ, метод РГ на каждом шаге учитывает оценку на каждой из полученных областей и не требует возврата к рассмотренным областям.

Следует отметить, что представленные в табл. 2, 5 результаты безотносительно к подходу, которым они были получены, подтверждают интуитивно ожидаемые, а именно:

- С увеличением размера области неопределённости время вычисления функции гибкости увеличивается.

Таблица 5 – Значения функции гибкости системы теплообменников, полученные методами РГ (χ_{PB}) и ВГ (χ_{VB})

№ п/п	Вариант конструкции	№ задачи	χ_{PB}	t_{PB}, c	χ_{VB}	t_{VB}, c
1	1	2	-0.94	0.734	-0.64	0.837
2	2	2	-0.09	0.750	-0.09	0.853
3	3	2	-5.81	0.641	-5.81	0.868
4	4	2	-6.16	0.656	-6.16	0.884
5	1	3	0.43	0.578	0.51	1.648
6	2	3	-0.27	0.812	-0.25	1.354
7	3	3	-5.30	0.703	-4.82	0.900
8	4	3	-4.71	0.718	-4.20	0.900
9	1	4	20.64	0.593	20.64	0.628
10	2	4	20.08	0.593	20.60	0.628
11	3	4	15.31	0.562	15.30	0.659
12	4	4	15.89	0.562	15.90	0.659

- Конструкции, являющиеся гибкими для малых размеров области неопределённости, как правило, не остаются таковыми с увеличением размера области неопределённости.

Увеличение размеров области неопределённости приводит к усложнению решения задачи определения работоспособного режима системы, поскольку происходит сужение области допустимых значений для режимных параметров. Чем больше становится область неопределённости, тем больше обнаруживается точек, в которых не выполняются проектные ограничения (критические точки), следовательно, для нахождения режима, обеспечивающего работоспособность ХТС в критических точках, задача оптимизации дополняется ограничениями, соответствующими данным точкам — увеличивается размерность задачи — растёт и сложность её решения.

Во второй главе также предложена и формализована постановка задачи оценки существования гибкой ХТС на заданной области неопределённости и алгоритм ее решения. Данная задача позволяет оценить целесообразность решения задачи проектирования оптимальной ХТС при заданных начальных условиях. Задача формулируется следующим образом:

$$E = \min_{d \in D} \max_{\theta \in T} \min_{z \in Z} \max_{j \in J} \psi_j(d, z, \theta) \quad (10)$$

При заданной топологии ХТС и для выбранного диапазона изменения неопределённых параметров построение гибкой ХТС возможно в том случае, когда $E \leq 0$.

Для решения задачи (10) предложено использовать обобщение вышеописанного эффективного подхода к решению задачи вычисления значения функции гибкости на заданной области неопределённости.

В том случае, если на k -ой итерации алгоритма РГ имеется разбиение области неопределённости T на подобласти T_l^k , удовлетворяющие условиям (5), верхняя оценка задачи (10) может быть получена решением задачи:

$$E^{U,k} = \min_{d, z_l, u} u \quad (11)$$

$$\max_{\theta \in T_l^k} \psi_j(d, z_l, \theta) \leq u, \quad j = \overline{1, m}, l = \overline{1, L_k} \quad (12)$$

Задача (11) представляет собой задачу полубесконечного программирования, для ее решения используется метод ВА.

Нижнюю оценку задачи (10) получаем из решения задачи НЛП:

$$E^{L,k} = \min_{d, z_q, u} u \quad (13)$$

$$\psi_j(d, z_q, \theta_q) \leq u, \quad \theta_q \in S^k, j = \overline{1, m} \quad (14)$$

Здесь S^k - множество критических точек, полученных на k -ой итерации алгоритма при решении задачи (11).

Алгоритм решения задачи оценки возможности создания гибкой ХТС на заданной области неопределённости идентичен алгоритму вычисления

значения функции гибкости за исключением того, что на шагах 2 и 3 алгоритма вместо задач (6) и (8) решаются задачи (11) и (13), соответственно.

Использование предложенного подхода в задаче «реактор-теплообменник» дало следующие результаты (см. табл. 6):

Таблица 6 – Оценка возможности создания гибкой ХТС для системы «Реактор-теплообменник»

№ задачи	V	A_T	E
2	12.75	14.97	-0.0426
3	12.67	14.19	-0.0391
4	12.58	12.22	-0.0362
5	13.16	15.09	-0.0352
6	13.42	13.96	-0.0306
7	12.65	14.67	-0.0173
8	26.00	26.00	24.3718

При решении задачи оценки возможности проектирования гибкой ХТС для системы теплообменников соответствие номеров задач различным размерам области неопределённости задавалось табл. 4.

В данном примере мы по-прежнему имеем 16 неопределённых параметров, но число поисковых переменных увеличилось до 9 вследствие включения в их число конструктивных параметров - поверхностей теплообмена теплообменников и холодильника $A_j, j = \overline{1, 8}$.

Результаты вычисления функции E предложенным способом представлены в табл. 7:

Таблица 7 – Оценка возможности создания гибкой ХТС для системы теплообменников

№ задачи	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	E
2	6.88	85.60	19.83	22.09	47.71	8.70	4.72	121.36	-6.16
3	6.63	87.39	19.87	22.27	47.62	8.93	4.55	118.73	-5.30
4	6.47	97.24	28.32	30.96	74.90	10.56	4.65	110.26	5.34

Как и в случае системы «Реактор-теплообменник», результаты вычислительного эксперимента показывают, что при некоторых размерах области неопределённости пропадает возможность создания гибкой ХТС, а следовательно, и целесообразность решения задачи оптимального проектирования гибкой ХТС.

Таким образом, предложенный подход к оценке возможности проектирования гибкой ХТС на заданной области неопределённости позволяет, во-первых, избежать лишних затрат на решение задачи оптимального проектирования, которая не сможет найти оптимальную гибкую конструкцию, во-вторых, полученная в результате оценки возможности проектирования гибкой ХТС конструкция, а также полученное в ходе решения задачи разбиение области неопределённости, могут быть использованы в качестве

начального приближения при решении задачи оптимального проектирования. Оба перечисленных свойства задачи позволяют сократить время решения задачи оптимального проектирования.

В третьей главе формулируется задача проектирования оптимальной гибкой ХТС на заданной области неопределённости. При формализации задачи учитывалось разделение жизненного цикла ХТС на два этапа: этап проектирования и этап функционирования. Поставленная задача приняла вид двухэтапной задачи оптимизации, где в качестве критерия используется математическое ожидание целевой функции задачи (1). В качестве ограничения в задаче выступает требование соблюдения гибкости ХТС, что сводит её к недифференцируемой многоэкстремальной задаче оптимизации. В главе также описан способ сведения такой задачи к задаче полубесконечного программирования и подход к ее решению, базирующийся на методе ВА:

$$f = \min_{d, z_i} \sum_{i \in I} w_i f(d, z_i, \theta_i) \quad (15)$$

$$\psi_j(d, z_i, \theta_i) \leq 0, \quad j = \overline{1, m}, i \in I \quad (16)$$

$$\psi_j(d, z, \theta) \leq 0, \quad j = \overline{1, m}, \forall \theta \in T \quad (17)$$

здесь критерий задачи представлен конечной аппроксимацией математического ожидания, I – множество номеров аппроксимационных точек, w_i – весовые коэффициенты.

Алгоритм решения следующий:

- Шаг 1. Задание стартовых значений: $k = 1$, d^0, z^0, θ^0 , некоторую малую величину $\varepsilon > 0$, область неопределённых параметров T , множество критических точек $S^0 = \emptyset$ (где k – номер итерации алгоритма).
- Шаг 2. Решить задачу

$$f = \min_{d, z_i, z_q} \sum_{i \in I} w_i f(d, z_i, \theta_i) \quad (18)$$

$$\psi_j(d, z_i, \theta_i) \leq 0, \quad j = \overline{1, m}, i \in I \quad (19)$$

$$\psi_j(d, z_q, \theta_q) \leq 0, \quad j = \overline{1, m}, \forall \theta_q \in S^k \quad (20)$$

здесь S^k – множество критических точек.

- Шаг 3. Вычисление функции гибкости. Для этого решим задачу

$$H^k(d^k) = \max_{\theta \in T} h(d^k, \theta) \quad (21)$$

- Шаг 4. Построение множества критических точек S^{k+1} . Проверяем условие

$$H^k(d^k) > \varepsilon \quad (22)$$

Если (22) верно (полученная на k -ой итерации конструкция d^k не является гибкой), то заносим соответствующие точки θ_q^k в множество критических точек S^{k+1} , иначе прекращаем решение - задача опти-

мального проектирования гибкой ХТС решена.

- Шаг 5. $k = k + 1$, перейти на шаг 2.

Решение задачи проектирования оптимальной гибкой ХТС методом ВА было проверено на примере системы «реактор-теплообменник». Для предложенного технологического процесса рассматривалась задача определения оптимальных значений конструктивных переменных V и A_T при наличии неопределенности в исходных данных. Задача оптимального проектирования системы «реактор-теплообменник» была решена в 2 постановках: одноэтапной (ОЭЗО) и двухэтапной (ДЭЗО), с применением различных методов: номинальная оптимизация, метод ВА, метод РГ.

Задача оптимального проектирования гибкой ХТС была решена по критерию приведённых затрат, описываемому формулой^V:

$$f = 691.2V^{0.7} + 873.6A_T^{0.6} + 1.76F_w + 7.056F_1 \quad (23)$$

При решении двухэтапной задачи оптимизации методом РГ с предразбиением предварительно была решена задача (10) и найденные значения конструктивных параметров V и A_T были использованы в качестве начальных приближений. Рассчитанные значения критерия оптимальности f , а также значения конструктивных переменных V и A_T приведены в табл. 8.

В табл. 9 показано сравнение результатов решения задачи проектирования системы «реактор-теплообменник» методами ВА и РГ с использованием предварительного разбиения по времени получения результатов.

Таблица 8 Результаты решения задачи проектирования оптимальной системы «реактор-теплообменник» с применением различных подходов и методов

№ задачи	Подход	f	V	A_T
1	номинальная	10354	5.42	5.21
2	ОЭЗО	10938	6.74	8.87
	ДЭЗО МВА	10938	6.74	8.87
	ДЭЗО РГ без предразб.	10938	6.74	8.87
	ДЭЗО РГ с предразб.	10938	6.74	8.87
3	ОЭЗО	21883	22.30	20.36
	ДЭЗО МВА	11324	7.09	9.63
	ДЭЗО РГ без предразб.	11324	7.09	9.63
	ДЭЗО РГ с предразб.	11338	7.12	9.52
4	ДЭЗО МВА	11767	7.48	10.39
	ДЭЗО РГ с предразб.	11830	7.64	10.41
5	ДЭЗО МВА	12261	7.85	11.42
	ДЭЗО РГ с предразб.	12401	8.20	11.35

Задача № 1 представляет собой задачу номинальной оптимизации. Для учёта неопределённости в исходной информации используем отраслевой коэффициент запаса 1.25 в качестве множителя для конструктивных па-

^V Halemane K.P., Grossmann I.E., 1983

Таблица 9 – Сравнение результатов проектирования оптимальной системы «реактор-теплообменник» по времени получения результатов

№ задачи	Подход	f	V	A_T	t , сек
2	МВА	10938	6.74	8.87	209.61
	МРГ с предразб.	10938	6.74	8.87	210.34
3	МВА	11324	7.09	9.63	212.14
	МРГ с предразб.	11338	7.12	9.52	212.91
4	МВА	11767	7.48	10.39	1284.59
	МРГ с предразб.	11830	7.64	10.41	1442.03
5	МВА	12261	7.85	11.42	1961.0
	МРГ с предразб.	12401	8.20	11.35	2734.72

раметров^{VI}. В результате получим конструкцию $V = 6.78$, $A_T = 6.51$.

Для анализа эффективности работы алгоритма была решена задача проектирования оптимальной гибкой ХТС на заданной области неопределённости в одноэтапной постановке с применением метода Монте-Карло для вычисления критерия задачи.

Как и предполагалось, номинальная конструкция не является гибкой ни для одного размера области неопределённости, а использование отраслевого коэффициента позволяет спроектировать гибкую ХТС лишь для малого диапазона изменения неопределённых параметров (см. табл. 10).

Таблица 10 – Значения функции гибкости для конструкции, полученной с использованием коэффициентов запаса

конструкция	V	A_T	№ задачи			
			2	3	4	5
номинальная (V, A_T)	5.42	5.21	1.0729	4.3073	7.5693	10.8595
эмпирическая ($V \cdot \eta, A_T \cdot \eta$)	6.78	6.51	-0.0006	0.0041	1.4561	4.8561

Анализируя приведённые в табл. 8 и 9 результаты, можно отметить, что:

- Решение ДЭЗО методом РГ целесообразно проводить при задании на первой итерации предварительного разбиения области неопределённости. Предварительное разбиение может быть получено решением задачи оценки возможности создания гибкой ХТС.
- Подход, основанный на методе ВА, позволяет решить задачу проектирования оптимальной гибкой ХТС без задания предварительного разбиения.
- При решении задачи проектирования оптимальной гибкой ХТС подход, опирающийся на метод ВА при вычислении $\chi(d)$ методом РГ, имеет преимущество в вычислительных затратах по сравнению с подходом, решающим ДЭЗО методом РГ, особенно с увеличением области неопределённости.

^{VI}Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. — Л.: Химия, 1987. — 576 с.

В случае примера «система теплообменников» задача проектирования содержит 16 неопределённых параметров и 9 поисковых переменных, включающих в себя в качестве конструктивных переменных поверхности теплообмена теплообменников и холодильника, а в качестве управлений - расход воды в холодильнике.

Целевой функцией является критерий приведённых затрат, учитывающий капитальные затраты на теплообменники и холодильник и операционные затраты на холодную воду^{VII}:

$$f = 145.6 \sum_{i=1}^8 A_i^{0.6} + 1530 F_w \quad (24)$$

Цель проектирования данной системы состояла в том, чтобы найти такие значения поверхностей теплообмена $A_j, j = \overline{1, 8}$ теплообменников и холодильника, которые бы позволили выполнить предъявляемые к системе требования на изменение температур выходных горячих T_H^{out} и холодных T_C^{out} потоков в заданных пределах, несмотря на изменение входных потоков во время этапа функционирования и неточное знание значений их коэффициентов теплопередачи.

Полученные в результате решения методами ВА и РГ значения конструктивных параметров совпадают с точностью 10^{-5} . Полученные значения критерия оптимальности составили: для задачи № 2 $f_2 = 12609.34$, для задачи № 3 $f_3 = 13069.64$. Значения целевой функции в случае номинальной оптимизации $f_{ном} = 10798.54$, при этом расчёт функции гибкости для номинальной конструкции с учётом отраслевого коэффициента дал следующие значения функции гибкости: для задачи №2 $\chi_2 = 2.62257$, для задачи №3 $\chi_3 = 3.28553$. Таким образом, полученная с использованием отраслевого коэффициента конструкция не будет гибкой на рассмотренных областях неопределённости.

Четвертая глава посвящена решению задачи проектирования оптимальной гибкой подсистемы узла захлаживания пирогаза (см. рис. 3). В главе приведена математическая модель подсистемы, сформулированы и решены задачи системного анализа существующей подсистемы на существующей и ожидаемой областях неопределённости, приведено краткое описание разработанного программного комплекса, сформулирована и решена задача проектирования оптимальной гибкой подсистемы узла захлаживания пирогаза.

Очищенный и осушенный пирогаз (поток № 1) последовательно проходит холодильники Т-303, Т-302. В холодильниках происходит прямоточная конденсация пирогаза с разделением паровой и жидкой фаз в сепараторе Е-314. Далее углеводородный конденсат (поток № 5) поступает на тарелки ввода питания метановой колонны К-301 на разделение.

^{VII}Nishida N, Liu Y.A, Lapidis L., 1977

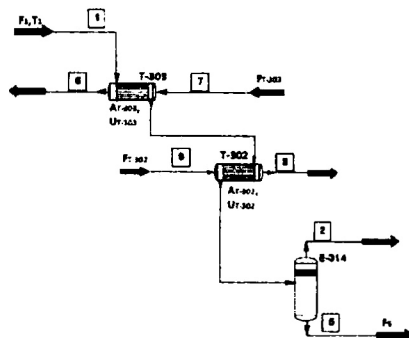


Рисунок 3 – Технологическая схема подсистемы узла захлаживания

Поисковыми переменными в задаче проектирования являются поверхности теплообменников AT_{-301} и AT_{-302} (m^2) – конструктивные переменные, расходы хладагентов F_{T-301} (поток № 7) и F_{T-302} (поток № 9), ($кг/ч$) – управляющие переменные. Непрерывными неопределёнными параметрами являются расход пирогаза F_1 ($кг/ч$), диапазоны изменения температуры пирогаза T_1 ($^{\circ}C$), коэффициенты теплопередачи U_{T-301} и U_{T-302} , ($\frac{Вт}{m^2 K}$).

В качестве ограничений в задаче проектирования оптимальной подсистемы используются качество разделения по этилену и метану:

$$\frac{F_{5,C_2H_4}}{F_{1,C_2H_4}} \geq 0.2, \quad \frac{F_{5,C_2H_6}}{F_{1,C_2H_6}} \leq 0.075 \quad (25)$$

где F_{1,C_2H_4} , F_{1,C_2H_6} , F_{5,C_2H_4} , F_{5,C_2H_6} – массовые расходы ($кг/ч$) метана и этилена в 1-ом и 5-ом потоках, соответственно.

Учёт дискретного неопределённого параметра – возможного состава пирогаза – производится путём введения в задачу оптимального проектирования дополнительного блока ограничений вида (25) на каждый вариант состава пирогаза. Вычисления производились с помощью разработанного программного комплекса, позволяющего подключать универсальные моделирующие программы (УМП) для расчёта стационарного состояния проектируемой системы, в частности, УМП Chemcad.

В соответствии с методикой, предложенной в главе 2, было вычислено значение функции гибкости для подсистемы узла захлаживания пирогаза (область неопределённости Ω_1 приведена в табл. 11, технологические ограничения задачи заданы формулами (25)): $\chi(332, 766) = -0.001293$, следовательно существующая конструкция является гибкой на существующей области неопределённости Ω_1 .

ОАО «КазаньОргсинтез» рассматривает возможность увеличения производительности данного производства: увеличение расхода сырья и изменение температуры пирогаза, поступающего на захлаживание. Новая область неопределённости Ω_2 отражена в табл. 11. Расчёт функции гибкости

для новой области неопределённости показал, что действующая система захлаживания не гарантирует выполнение требований (25) на ожидаемой области неопределённости Ω_2 , поскольку $\chi(332, 766) = 0.005408$. Было принято решение спроектировать новую эффективную подсистему узла захлаживания пирогаза.

Таблица 11 – Границы области неопределённости

Область	Граница	F_1 , кг/ч	T_1 , °C	U_{T-303} , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$	U_{T-302} , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$
существующая Ω_1	минимальная	64000	-2.6	525	480
	максимальная	69000	-2.0	550	500
ожидаемая Ω_2	минимальная	67000	-2.6	525	480
	максимальная	74000	0.0	550	500

Задача проектирования содержит 4 неопределённых параметра и 4 управляющих переменных. В качестве критерия оптимальности использовался критерий приведённых затрат, предложенный Дытнерским Ю.И.^{VIII}:

$$R(A_{T-303}, A_{T-302}, F_{T-303}, F_{T-302}) = 5815.0665 A_{T-303} + 7213.536 A_{T-302} + 21642.7488 (N_{F_{T-303}} + N_{F_{T-302}}) \quad (26)$$

здесь $N_{F_{T-303}}$ и $N_{F_{T-302}}$ — мощности нагнетателей потоков 7 и 9, соответственно.

Задача проектирования оптимальной подсистемы формулируется следующим образом: найти такие значения управляющих переменных $A_{T-303}, A_{T-302}, F_{T-303}, F_{T-302}$, при которых значение критерия (26) будет минимальным, и будут выполняться ограничения (25) на всей области неопределённости Ω_2 :

$$\min_{A_{T-303}, A_{T-302}, F_{T-303}, F_{T-302}} R(A_{T-303}, A_{T-302}, F_{T-303}, F_{T-302}) \quad (27)$$

$$\psi_1 = \frac{F_{5, C_2H_4}}{F_{1, C_2H_4}} \geq 0.2 \quad (28)$$

$$\psi_2 = \frac{F_{5, CH_4}}{F_{1, CH_4}} \leq 0.075 \quad (29)$$

$$\varphi(A_{T-303}, A_{T-302}, F_{T-303}, F_{T-302}, F_1, x_{1,i}, T_1, U_{T-303}, U_{T-302}) = 0 \quad (30)$$

где (30) — уравнения математической модели

Результат решения задачи оптимального проектирования гибкой подсистемы узла захлаживания пирогаза методом ВА приведён в табл. 12, для сравнения приведено значение критерия, вычисленного для работающей системы.

^{VIII}Ю.И. Дытнерский, Процессы и аппараты химической технологии. Часть 1. — М.: Химия, 1995. — 400 с.

Таблица 12 – Решение задачи проектирования оптимальной подсистемы узла за-
холаживания пирогаза

узел захолаживания	$A_{T-303},$ м ²	$A_{T-302},$ м ²	R руб/год	Экономия руб/год	$\left \frac{R_2 - R_1}{R_1} \right $
1. существующий	332	766	7898752.66	—	—
2. предлагаемый	400	600	7768142.50	130610.17	1.68%

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны новый эффективный способ и алгоритм для вычисления функции гибкости химико-технологических систем, основанный на разбиении области неопределённости и получении оценок функции гибкости.
2. Предложен подход для оценки возможности создания гибкой химико-технологической системы на заданной области неопределённости, в основу которого положен тест гибкости. Предложенный подход позволяет сократить временные затраты при решении задачи оптимального проектирования.
3. Разработан алгоритм реализации предложенного подхода оценки возможности создания гибкой химико-технологической системы, базирующийся на предложенной адаптации методов внешней аппроксимации и разбиения и границ.
4. Предложен новый эффективный подход решения задачи оптимального проектирования химико-технологических систем с учетом неопределённости исходной информации, использующий предложенный эффективный способ вычисления функции гибкости.
5. Разработан алгоритм решения задачи оптимального проектирования гибких химико-технологических систем на основе метода внешней аппроксимации.
6. Созданные алгоритмы интегрированы в программный комплекс оптимального проектирования химико-технологических систем с учетом неопределённости в исходной информации, способный решать перечисленные задачи.
7. Программный комплекс апробирован на решении ряда оптимизационных задач. Полученные результаты позволяют говорить об эффективности предложенных подходов и алгоритмов.

Основные публикации по теме работы

Публикации в ведущих научных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. Островский, Г.М. Оценка гибкости химико-технологических систем // Г.М. Островский, Н.Н. Зиятдинов, Т.В. Лаптева, И.Д. Первугин // Теоретические основы химических технологий, т. 41, № 3. — Москва,

2007 г. — С. 249-261.

2. Островский, Г.М. О некоторых подходах к проектированию технических систем с учетом неопределенности исходной информации // Г.М. Островский, Н.Н. Зиятдинов, Т.В. Лаптева, И.Д. Первухин // Системы управления и информационные технологии, № 2 (36). — Воронеж, 2009. — С. 83-87.
3. Островский, Г.М. Учет неопределённости при проектировании оптимальных химико-технологических систем // Г.М. Островский, Н.Н. Зиятдинов, Т.В. Лаптева, И.Д. Первухин // Вестник Казанского технологического университета. — 2011. — № 6. — С. 199-206.

Публикации в сборниках трудов научных конференций:

4. Лаптева, Т.В. Определение значения функции гибкости технологической системы // Т.В. Лаптева, Н.Н. Зиятдинов, И.Д. Первухин, Г.М. Островский // Сб. трудов XX Международ. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях», Т. 2. — Ярославль, 2007. — С. 7-9.
5. Первухин, И.Д. Вычисление функции гибкости химико-технологических систем // И.Д. Первухин, Т.В. Лаптева, Н.Н. Зиятдинов, Г.М. Островский // Материалы II Международной научной конференции «Современные проблемы прикладной математики и математического моделирования». — Воронеж, 2007. — С. 147-148.
6. Первухин, И.Д. Учет неопределенности при проектировании химико-технологических систем // И.Д. Первухин, Т.В. Лаптева, Г.М. Островский, Н.Н. Зиятдинов // Сб. трудов XXI Международ. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях», Т. 2. — Саратов, 2008 — С. 5-8.
7. Первухин, И.Д. Проектирование и исследование экономически эффективных химико-технологических процессов с учетом неопределенности // И.Д. Первухин, Т.В. Лаптева, Г.М. Островский, Н.Н. Зиятдинов // Сборник научных трудов по материалам Третьей Международной научно-практической конференции «Логистика и экономика ресурсосбережения и энергосбережения в промышленности». — Казань, 2008. — С. 290-293.
8. Первухин, И.Д. Анализ и проектирование химико-технологических систем с учетом неопределенности // И.Д. Первухин, Т.В. Лаптева, Г.М. Островский, Н.Н. Зиятдинов // Сб. трудов XXII Международ. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях», Т. 2. — Псков, 2009. — С. 5-7.

Заказ 150

Тираж 100 экз.

420015, г. Казань, ул. К.Маркса, д. 68
Офсетная лаборатория Казанского государственного
технологического университета